

A.A. Loukianov, N.N.Shangin, A.A. Zaitsev, Yu.S. Yuriev

DEVELOPMENT OF THE CONTAINMENT CODE KUPOL-M

The software KUPOL-M is developed in thermophysical department of IPPE since 1989 as a best estimate code for evaluation of thermodynamic parameters in the VVER-type NPP's containment volume under LOCA conditions. In comparison with the certified by GAN RF version of the code (1998) new version contains essential additions, both in a functional part, and in a part of an opportunity of input of the initial data.

The mathematical models of the hydrogen distribution and mitigation, model of condensed water moving between compartments are entered into a code KUPOL-M. Inclusion of the convective momentum transfer enables description of the jet flow. The extended analytical tests for check of algorithms of the differential equations solution are carried out. The verification of mathematical models of the hydrogen distribution and recombination is spent. Now on the basis of KUPOL-M code version 1.03 the calculations in a substantiation of the VVER-1000 containments of export design NPP's are carried out.

РАЗВИТИЕ КОНТЕЙНМЕНТНОГО КОДА КУПОЛ-М

А.А.Лукьянов, Н.Н.Шаньгин, А.А.Зайцев, Ю.С.Юрьев

ГНЦ РФ ФЭИ им.А.И.Лейпуского

Программное средство КУПОЛ-М разрабатывается в теплофизическом отделении ГНЦ РФ ФЭИ с 1989 года в качестве кода улучшенной оценки термодинамических параметров в объёме защитной оболочки АЭС с ВВЭР при авариях типа ЛОСА по заказу Санкт-Петербургского научно-

исследовательского и проектно-конструкторского института АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ.

В течение десяти лет в разработке кода КУПОЛ-М принимали участие следующие сотрудники ГНЦ РФ ФЭИ:

А.Д.Ефанов	Ю.С.Юрьев	Е.В.Номофилов	В.М.Кащев
А.А.Зайцев	А.Г.Годизов	А.А.Лукьянов	Т.В.Попова
С.И.Морозова	Л.В.Марина	Б.Г.Бажин	и др.

Ответственным исполнителем по разработке версии 1.0 кода является Н.Н.Шаньгин.

Существенный вклад в разработку кода на этапах его тестирования и функционального наполнения внесен усилиями сотрудников СПБАЭП В.В.Безлепкина, С.Е.Семашко, И.М.Ивкова.

В настоящее время код КУПОЛ-М разрешен к использованию в следующих организациях МинАтома РФ:

ГНЦ РФ ФЭИ, СПБАЭП, НИТИ, ОКБ Гидропресс.

1 Назначение кода

Первоначально разработка кода **КУПОЛ-М** проводилась в рамках проекта ВВЭР нового поколения НП-500 (ВВЭР-640), спецификой которого является преимущественное использование пассивных систем безопасности. В частности, спринклерная система в нем рассматривается как вспомогательное средство. Соответственно, основное внимание при разработке кода уделялось анализу теплофизических процессов, протекающих в объеме аварийного контейнента и выбору обоснованных замыкающих соотношений. В плане программной реализации обеспечена возможность описания произвольной геометрии задачи. Модульность построения кода и следование стандарту языка программирования

FORTRAN-77 в значительной мере облегчило процесс «сшивки» кодов **PARNAS-КУПОЛ-SPAS**¹ на уровне исходного текста. На этом этапе (1995 г.) была выпущена первая замороженная версия кода **КУПОЛ-М**. Эта версия аттестована в ГАН РФ в приложении к расчету термодинамических параметров среды в объеме защитной оболочки АЭС с ВВЭР-640 при авариях с течью теплоносителя.

Версия 1.0

Необходимость проведения анализа безопасности защитных оболочек АЭС с ВВЭР в условиях запроектных аварий обусловила расширение области применимости кода за счет введения моделей, описывающих поведение водорода, динамику конденсата и инженерные системы безопасности.

Замороженная версия 1.0 кода **КУПОЛ-М** выпущена в сентябре 1999 г. и используется для проведения анализа водородной безопасности проекта ВВЭР-1000 (СПбАЭП).

2 Программа развития моделей кода

В результате анализа спектра процессов тепломассопереноса, протекающих в атмосфере аварийного контейнента АЭС с ВВЭР, и набора моделей кода КУПОЛ-М версии 1.0 была определена необходимость модернизации кода в плане разработки и реализации в нем следующих физико-математических моделей:

2.1 Модели массопереноса капельной составляющей смеси и газов CO, CO₂, а также произвольного газа:

Введение произвольного газа предусмотрено для резервирования возможности удовлетворения потребностей расчетов сценариев, по

¹ **PARNAS** - код расчета параметров аварийного бассейна (НИТИ). **SPAS** - код расчета параметров СПОТ ГО для ВВЭР-640 (СПбАЭП)

которым в настоящее время не сформулированы конкретные требования и, таким образом, расширяет универсальность кода.

Такое расширение списка учитываемых компонентов газовой фазы требует изменения соответствующих массивов, доработки модулей расчета теплофизических свойств и горения в газовой фазе.

2.2 Модель массопереноса воды и модель прямков, описывающая идеальное перемешивание воды и вытеснение вышележащими слоями предусматривает введение в код КУПОЛ-М уравнения энергии для воды и учет тепло- и массообмена (испарение/конденсация) зеркала воды с атмосферой соответствующего помещения контейнента.

2.3 Модели пассивных каталитических рекомбинаторов водорода с различными типами активного каталитического элемента - предполагает разработку нестационарного одномерного специализированного модуля для замещения существующего точечного “универсального”. Модели рекомбинаторов водорода пластинчатого и стержневого типа должны описывать нестационарный теплообмен химически реагирующей водородосодержащей смеси с подложкой катализатора с учетом распределения концентрации водорода и температуры катализатора по высоте каталитической поверхности (одномерная модель тепломассопереноса). Нестационарное уравнение теплопроводности для подложки катализатора должно учитывать геометрию подложки (плоская, осесимметричная).

2.4 Модели связей между помещениями по газокапельной смеси должны включать имитацию работы вентилятора, фильтра, барботера. Модель вентиляционной системы должна включать в себя отдельно задаваемые связи между помещениями с известными расходами газокапельной смеси, либо известными напорами (перепадами давления) в них (имитация работы вентиляторов в данных связях) с подогревом или

охлаждением этой смеси. Для фильтров должны быть заданы гидравлические характеристики.

2.5 Модели горения водорода различного типа:

Модель горения водорода, основанная на эмпирических зависимостях, должна описывать как медленный дефлаграционный режим, так и режим факельного горения. Кроме того, модуль расчета горения следует дополнить блоком для определения возможного режима горения, включая детонацию.

Кроме того, предусматривается обеспечение возможности 3D-анализа картины течения в отдельных помещениях, связанных с “точечными” боксами.

3 Программа дальнейшей верификации кода

Программа верификации кода КУПОЛ-М дополняет матрицу верификации кода в части явлений, связанных с анализом поведения водорода в контейменте. Программа верификации включает проведение экспериментальных исследований на установках ФЭИ и ВНИИЭФ, а также анализ данных стандартных задач: международной E11.2, проведенной на крупномасштабной установке HDR и российской БК/В-213, проведенной на стенде ЭНИЦ.

Цели и задачи проведения расчетно-экспериментальных работ по дальнейшей верификации кода КУПОЛ-М суммированы в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальная установка	Экспериментальные исследования	Срок проведения экспериментов / расчетов
Стенд HDR	Стандартная задача (Эксперимент E11.2)	1999-2000 г.
Стенд БК/В-213	Моделирование аварии с большой течью в СЛА ВВЭР-440	2000 г.
Стенд ВНИИЭФ 416М (объем 70 м ³)	Моделирование распространения водорода по помещениям контейнента в присутствии пара и воздуха. Испытание натуральных рекомбинаторов и исследование их взаимовлияния друг на друга	1999-2001 г.
Стенды ФЭИ ВКМ (объем 8 м ³) ДКМ (объем 220 м ³)	Моделирование распространения водорода по помещениям контейнента в присутствии пара и воздуха. Исследование эффективности удаления водорода модельными рекомбинаторами. Работа спринклерной системы и ее влияние на массоперенос водорода	1999-2001 г.

Заключение

Реализация намеченной программы расчетно-экспериментальных работ позволяет обеспечить возможность анализа процессов тепломассопереноса при запроектных авариях в оболочках полного давления с использованием кода КУПОЛ-М версии 1.1.